

2.Бобух А.А., Ковалев Д.А. Разработка системы диагностики аварийных ситуаций объектов централизованного теплоснабжения // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.84. – К.: Техніка, 2008. – С.167-172.

3.Бобух А.А., Ковалев Д.А. Усовершенствование объектов системы централизованного теплоснабжения и повышения эффективности их эксплуатации // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.93. – К.: Техніка, 2010. – С.404-407.

4.Ковалев Д.А. Некоторые аспекты экономии тепловой энергии в закрытой системе централизованного теплоснабжения / Д.А. Ковалев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2009. – №7 (65). – С.19-23.

*Получено 02.11.2011*

УДК 697.14

А.Ф.СТРОЙ, д-р техн. наук, Р.С.МЯГКОХЛЕБ

*Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка*

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ЦЕХЕ НА ПРОЦЕСС СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ**

Рассмотрены процессы изменения температуры воздуха в цехе при сушке древесины. Сформулированы граничные условия необходимые для решения уравнения теплопроводности при сушке древесины. Приведена математическая модель граничных условий

Розглянуто процеси зміни температури повітря у цехах при сушінні деревини. Сформульовано граничні умови необхідні для вирішення рівнянь теплопровідності при сушінні деревини. Наведено математичну модель граничних умов.

Changing the temperature of air in the shops during drying of wood were considered. Boundary conditions are allocated.

*Ключевые слова:* граничные условия, сушка, тепловой поток.

Сушка древесины – сложный и энергоемкий процесс. Основные технологические параметры, что влияют на процесс сушки, – температура и влажность воздуха как агента сушки. Поэтому исследования влияния температуры воздуха в цехах на процесс сушки древесины имеют важное значение.

Анализ публикаций [1-5] показал, что при рассмотрении сушки древесины исследователи акцентировали свое внимание на процессы, которые происходят непосредственно в материале, при этом упрощали граничные условия на поверхности материала, т.е. принимали температуру воздуха в цехе постоянной. Данную ситуацию отчасти спровоцировали нормативные документы [6-8], которые жестко привязывали параметры воздуха к средней влажности и температуре материала, это в определенной степени гарантировало качество древесины. При этом применялось ступенчато-дисперсное регулирование параметров воздуха. С другой стороны, интуитивно понятно, что плавное регулирование параметров воздуха будет экономичнее, чем ступенчато-дискретное. Необ-

ходимость экономии энергии в процессе сушки заставляет исследователей рассматривать и анализировать более сложные процессы, которые дадут возможность плавного регулирования параметров воздуха в цехе.

Исследование влияния сушильного агента – воздуха на процесс сушки, как правило, ограничивалось определением с помощью i-d-диаграммы количества приточного воздуха. При этом учитывался адиабатный процесс увлажнения воздуха, а поток влаги с древесины принимался постоянный и усредненный по всему времени сушки материала. Такая упрощающая предпосылка не соответствует действительному процессу. Поток влаги в процессе сушки изменяется от максимальных значений до нуля. Аналогично изменяется расход тепла. Задача заключается в том, чтобы определить какая должна быть температура воздуха в цехе в процессе сушки, чтобы расход тепла был минимальный. Для этого необходимо оценить влияние температуры воздуха на процесс сушки.

Цель статьи – рассмотреть влияние температуры воздуха в цехе на процесс сушки древесины. Сформулировать и представить в виде математической модели граничные условия, которые оказывают наиболее существенное влияние на процесс сушки.

Как уже упоминалось, в процессах сушки древесины, в качестве сушильного агента выступает воздух. Воздух поглощает влагу, которая испаряется с поверхности материала. При этом, чтобы происходил процесс испарения необходимо к поверхности подводить тепло. Тепло можно подвести как с помощью воздуха, так и другим путем. Если температура воздуха выше температуры поверхности материала, который необходимо высушить, то между воздухом и поверхностью материала за счет разности температур будет происходить конвективный теплообмен.

Чем больше разность температур

$$\Delta t = t_g - t_o, \quad (1)$$

тем больший конвективный тепловой поток будет поступать к поверхности материала и тем больше влаги будет испаряться с поверхности. В уравнении (1) приняты обозначения:  $t_g$  – температура воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_o$  – температура поверхности материала,  $^{\circ}\text{C}$ .

С другой стороны, количество испаряемой влаги будет зависеть от разности парциальных давлений водяных паров на поверхности материала и в воздухе, который омывает эту поверхность. Чем больше разность парциальных давлений, тем больше влаги будет испаряться с поверхности.

Если тепло подводится с помощью сушильного агента, т.е. с помощью воздуха, то процесс сушки называют конвективной сушкой. Тепло

к поверхности материала можно также подводить в результате лучистого теплообмена. Лучистый тепловой поток будет поступать к поверхности материала, когда окружающие материал предметы имеют более высокую температуру. В этом случае процесс сушки называют лучистой сушкой. В общем случае, к примеру, процесс естественной сушки можно отнести к лучисто-конвективной сушке.

Таким образом, если конвективный тепловой поток, который поступает к поверхности материала при сушке, существенно превышает лучистый, то такой процесс называют конвективной сушкой. Если наоборот, лучистый тепловой поток превышает – лучистой сушкой.

Параметры воздуха, т.е. температура и влажность в сушильном цехе, зависят от процессов тепло- и массообмена, происходящих в цехе. Рассмотрим процесс формирования температуры воздуха в сушильном цехе при конвективно-лучистой сушке древесины. Чтобы глубже понять процессы тепло- и массообмена, которые происходят у поверхности древесины, так называемые граничные условия, рассмотрим несколько идеализированный случай, когда древесина (доски) сложена в штабель таким образом, что воздушные прослойки между досками отсутствуют. Процессы тепло- и массообмена происходят только у поверхности, т.е. на границе воздух-дерево. В сушильный цех поступает наружный воздух с температурой  $t_n$  и удаляется из цеха с температурой  $t_g$ .

Температура воздуха в цехе формируется в результате конвективного теплообмена воздуха с окружающими предметами. Скорость изменения температуры воздуха, т.е.  $\frac{dt_g}{d\tau}$ , зависит от разности тепловых потоков, которые поступают к воздуху и которые воздух отдает материалу и ограждающим конструкциям цеха. Схема тепловых потоков показана на рис.1, а уравнение теплового баланса, которое характеризует скорость изменения температуры воздуха, имеет вид:

$$cm \frac{dt_g}{d\tau} = Q_o + Q_g^{ex} - Q_d - Q_{m.n.} - Q_g^{exl}, \quad (2)$$

где  $c$  – теплоемкость воздуха,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ ;  $m$  – масса воздуха, кг;  $\tau$  – время, с;  $Q_o$  – конвективный тепловой поток, который поступает к воздуху от нагревательных приборов, расположенных в цехе, Вт;  $Q_g^{ex}$  – тепловой поток, который входит в помещение совместно с воздухом, необходимым для процесса сушки, Вт,

$$Q_{\text{в}}^{\text{вх}} = cGt_{\text{н}};$$

$G$  – расход воздуха, который входит в цех и удаляется из него, кг/с;  $t_{\text{н}}$  – температура наружного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $Q_{\text{о}}$  – тепловой поток, который поступает от воздуха к поверхности дерева, Вт;  $Q_{\text{м.п.}}$  – тепловой поток, который поступает от воздуха к внутренней поверхности ограждения, Вт. При стационарном режиме этот тепловой поток равен теплопотерям через ограждающие конструкции;  $Q_{\text{в}}^{\text{вх}}$  – тепловой поток, который выходит из помещения совместно с удаляемым воздухом, Вт,

$$Q_{\text{в}}^{\text{вх}} = cGt_{\text{в}}.$$

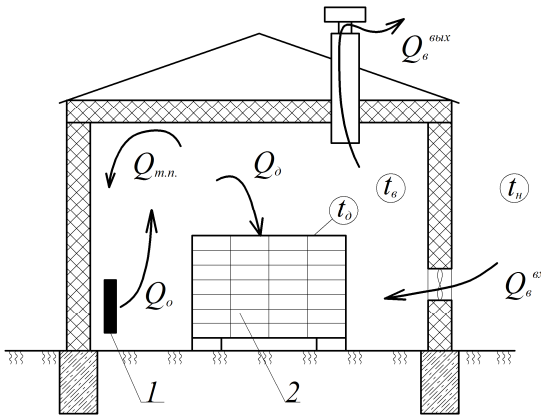


Рис.1 – Схема тепловых потоков в сушильном цехе:  
1 – нагревательный прибор; 2 – штабель древесины.

Уравнение (2) характеризует конвективный теплообмен в помещении, т.е. у поверхности нагревательных приборов, ограждающих конструкций и поверхности древесины. Чтобы полностью охарактеризовать теплообмен в помещении с учетом лучистого теплообмена и граничные условия для расчета процесса теплопроводности внутри самой древесины, необходимо дополнительно к уравнению (2) составить уравнения лучистого теплообмена в помещении, точнее лучисто-конвективного теплообмена. При заданной температуре на поверхности нагревательного прибора и площади его поверхности лучистый теплообмен будут характеризовать температура на внутренней поверхности стен,  $t_{\text{ст}}$ , и температура на поверхности древесины. Схема тепловых потоков лучисто-

конвективного теплообмена у поверхності наружних стен и у поверхності деревесины показана на рис.2.

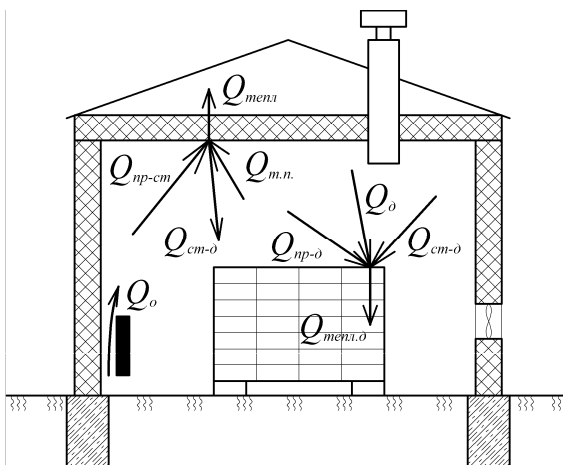


Рис.2 – Схема тепловых потоков лучисто-конвективного теплообмена

Уравнение теплового баланса для определения температуры на внутренней поверхности стены имеет вид:

$$Q_{нр-ст} + Q_{м.н.} = Q_{тепл} + Q_{ст-д}, \quad (3)$$

где  $Q_{нр-ст}$  – лучистый тепловой поток, который поступает от нагревательного прибора к внутренней поверхности наружных стен, Вт;  $Q_{тепл}$  – тепловой поток, который от внутренней поверхности поступает в конструкцию стены в результате теплопроводности, Вт;  $Q_{ст-д}$  – тепловой поток, который излучает стена на поверхность древесины (предполагается, что температура внутренней поверхности стены выше температуры поверхности древесины, если наоборот, то этот тепловой поток будет входить в уравнение (3) со знаком “-”), Вт.

Уравнение теплового баланса для определения температуры на поверхности штабеля древесины можно записать в виде:

$$Q_{нр-д} + Q_{д} + Q_{ст-д} = Q_{тепл.д}, \quad (4)$$

где  $Q_{нр-д}$  – лучистый тепловой поток, который поступает от прибора к поверхности древесины, Вт;  $Q_{ст-д}$  – лучистый тепловой поток, который поступает от внутренней поверхности стен к поверхности древесины, в случае, если  $t_{ст} > t_{д}$ . Если наоборот, то этот тепловой поток имеет знак

“-”, Вт;  $Q_{\text{тепл.д}}$  – тепловой поток, который в результате теплопроводности поступает в глубь древесины и в дальнейшем идет на повышение температуры материала и на испарение влаги из него, Вт.

Уравнения (2)-(4) представляют собой систему уравнений, которая дает возможность определить температуру воздуха в цехе, температуру внутренней поверхности стен и температуру на поверхности штабеля дерева (граничные условия для расчета процесса теплопроводности). Для определения этих температур нужно в уравнения (2)-(4) вместо тепловых потоков подставить их значения, выраженные через параметры и решить данную систему уравнений относительно функций изменения температур  $t_e(\tau)$ ,  $t_{cm}(\tau)$ ,  $t_o(\tau)$ .

На точность определения численного значения температур в заданный момент времени будут оказывать влияние коэффициенты взаимоблужения, вычисление которых представляет некоторую сложность, а также тепловые потоки, которые возникают в результате теплопроводности ограждающих конструкций и древесины. При нестационарном режиме определить эти тепловые потоки несколько сложно.

Таким образом, если анализировать процесс теплообмена на поверхности материала при сушке древесины (граничные условия), то этот процесс можно охарактеризовать смешанными граничными условиями второго и третьего рода.

Граничные условия второго рода характеризуют тепловой поток, который поступает к поверхности в результате лучистого теплообмена, и граничные условия третьего рода – конвективный теплообмен с воздухом. Эти граничные условия, после решения системы уравнений (2)-(4) и определения функций изменения температур  $t_e(\tau)$ ,  $t_{cm}(\tau)$ ,  $t_o(\tau)$  могут быть приведены к граничным условиям первого рода, для процессов теплопроводности, которые происходят в массиве древесины и в ограждающих конструкциях цеха.

Если рассматривать в помещении лучисто-конвективный теплообмен совместно, то можно записать несколько приближенное уравнение, которое будет характеризовать процесс теплообмена в помещении. Это уравнение имеет вид:

$$cm \frac{dt_e(\tau)}{d\tau} = Q_o^c + Q_e^{ex} - (Q_o^c + Q_{m.n.}^c + Q_e^{ex}). \quad (5)$$

Верхний индекс «с» в обозначениях тепловых потоков, которые входят в уравнение (5) характеризует тот факт, что тепловой поток является лучисто-конвективным.

В этом случае граничные условия теплообмена у поверхности древесины сводятся к граничным условиям третьего рода, при известном коэффициенте лучисто-конвективного теплообмена.

Если в уравнение (5) подставить вместо тепловых потоков их значения, то получим уравнение

$$cm \frac{dt_{\epsilon}(\tau)}{d\tau} = \alpha_{np} F_{np} (t_{np} - t_{\epsilon}(\tau)) + cGt_n - \\ - (\alpha_{\delta} F_{\delta} (t_{\epsilon}(\tau) - t_{\delta}(\tau)) + \alpha_{cm} F_{cm} (t_{\epsilon}(\tau) - t_{cm}(\tau)) + cGt_{\epsilon}(\tau)),$$

или

$$cm \frac{dt_{\epsilon}(\tau)}{d\tau} = \alpha_{np} F_{np} (t_{np} - t_{\epsilon}(\tau)) + cG(t_{\epsilon}(\tau) - t_n) - \\ - \alpha_{\delta} F_{\delta} (t_{\epsilon}(\tau) - t_{\delta}(\tau)) + \alpha_{cm} F_{cm} (t_{\epsilon}(\tau) - t_{cm}(\tau)), \quad (6)$$

В уравнении (6) приняты следующие обозначения:  $\alpha_{np}$ ,  $\alpha_{\delta}$ ,  $\alpha_{cm}$  – коэффициент лучисто-конвективного теплообмена соответственно у поверхности нагревательного прибора, у поверхности древесины и у поверхности ограждающей конструкции цеха,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ ;  $F_{np}$ ,  $F_{\delta}$ ,  $F_{cm}$  – соответственно площадь поверхности нагревательного прибора, площадь материала и площадь теплообмена ограждающей конструкции цеха,  $\text{м}^2$ .

Как правило, параметры, которые характеризуют теплообмен, в частности коэффициенты теплообмена  $\alpha_{np}$ ,  $\alpha_{\delta}$ ,  $\alpha_{cm}$ , площади  $F_{np}$ ,  $F_{\delta}$ ,  $F_{cm}$  и расход воздуха  $G$  при расчете процесса теплообмена в цехе должны быть заданы. Тогда уравнение (6) содержит три неизвестных параметра – это температура воздуха в цехе  $t_{\epsilon}(\tau)$ , температура на поверхности древесины  $t_{\delta}(\tau)$  и температура на поверхности ограждения  $t_{cm}(\tau)$ . Для решения этого уравнения необходимо еще два уравнения, которые будут характеризовать тепловой баланс на поверхности древесины и тепловой баланс на поверхности ограждающих конструкций цеха.

Уравнение теплового баланса на поверхности материала (4) в разрезе совместного лучисто-конвективного теплообмена будет иметь вид:

$$\alpha_{\delta} F_{\delta} (t_{\epsilon}(\tau) - t_{\delta}(\tau)) = Q_{\text{тепл.}\delta}, \quad (7)$$

где, как уже упоминалось,  $Q_{\text{тепл.д}}$  – это тепловой поток, который в результате теплопроводности, поступает от поверхности древесины в глубь. В общем случае этот тепловой поток зависит от времени  $\tau$ , координат  $x, y, z$  и интенсивности испарения влаги в древесине, т.е. интенсивности сушки. Его можно определить только после решения уравнения теплопроводности, т.е. после определения температурного поля и градиента температур в любой точке поверхности. При нестационарном режиме, температурное поле с равномерно распределенными в массиве внутренними стоками тепла описывается уравнением Фурье (трехмерная задача)

$$c\rho \frac{dt(x, y, z, \tau)}{d\tau} + Q_w(x, y, z, \tau) = \lambda \left( \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right),$$

где  $c, \rho, \lambda$  – соответственно теплоемкость, плотность и теплопроводность материала;  $Q_w(x, y, z, \tau)$  – равномерно распределенные в массиве материала стоки тепла.

Стоки тепла в элементарном объеме массива древесины это расход тепла на испарение влаги в этом объеме в заданный момент времени. Для одномерной задачи уравнение Фурье упрощается и приобретает вид:

$$c_o \rho_o \frac{dt_o(x, \tau)}{d\tau} + Q_w(x, \tau) = \lambda_o \frac{\partial^2 t_o(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (8)$$

Для решения уравнения (8), т.е. для определения температурного поля в массиве, необходимо знать функцию  $Q_w(x, \tau)$ . Эту функцию можно определить в том случае, если будет известно количество влаги, которое испаряется в элементарном объеме с заданной координатой  $x$  и в заданный момент времени  $\tau$ . Обозначим эту функцию –  $w(x, \tau)$ , тогда

$$Q_w(x, \tau) = rw(x, \tau), \quad (9)$$

где  $Q_w(x, \tau)$  – количества тепла в массиве древесины, что пошла на испарение влаги, Вт/м<sup>2</sup>;  $r$  – скрытая теплота парообразования, Дж/кг;  $w(x, \tau)$  – количество влаги, которая испаряется в элементарном объеме с заданной координатой и за заданный промежуток времени,

$$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}.$$



Подставив (9) в уравнение (8) получим зависимость, которая описывает процесс теплопроводности в зависимости от количества испаряемой влаги

$$c_o \rho_o \frac{dt_o(x, \tau)}{d\tau} = \lambda_o \frac{\partial^2 t_o(x, \tau)}{\partial x^2} - rw(x, \Delta \tau). \quad (10)$$

Уравнение (10) – это второе уравнение, которое дает возможность определить функцию  $t_o(\tau)$ . Для определения третьей функциональной зависимости, т.е.  $t_{cm}(\tau)$ , необходимо определить тепловой поток, который в результате теплопроводности поступает в ограждающую конструкцию.

$$c_{cm} \rho_{cm} \frac{dt_{cm}(x, \tau)}{d\tau} = \lambda_{cm} \frac{\partial^2 t_{cm}(x, \tau)}{\partial x^2}. \quad (11)$$

Другими словами нужно решить уравнение (11) при граничных условиях (12)

$$\alpha_{cm} F_{cm} (t_g(\tau) - t_{cm}(\tau)) = Q_{менл}. \quad (12)$$

Одномерной задачей, с определенным приближением можно считать задачу, когда в цехе сушится, к примеру, одна доска. В этом случае, в силу того, что толщина доски значительно меньше ее размеров  $a$  и  $l$  (рис.3) задача может рассматриваться как одномерная, с изменением температуры только по координате  $x$  и направлением теплового потока также только вдоль координаты  $x$ .

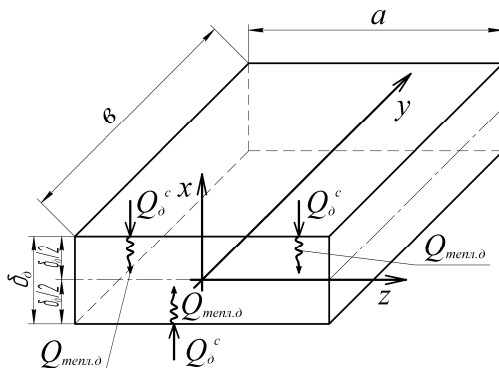


Рис.3 – Схема расположения координат для доски

Задачу теплопроводности доски можно рассматривать как осесимметричную с граничными условиями третьего рода (7), которые в данном случае имеют вид:

$$\alpha_o F_o \left( t_e(\tau) - t_o(\tau) \Big|_{x=\frac{\delta_o}{2}} \right) = \lambda_o \frac{\partial^2 t_o(\tau)}{\partial x^2} \Big|_{x=\frac{\delta_o}{2}}, \quad (13)$$

где  $F_o = 2 \cdot a \cdot b$ .

Левая часть уравнения (13) представляет собой тепловой поток, который поступает от воздуха к поверхности древесины, а правая – тепловой поток, который поступает от поверхности доски вглубь массива древесины. Этот тепловой поток затрачивается на нагрев материала и испарение влаги с массива древесины.

Граничные условия у внутренней поверхности наружного ограждения цеха (уравнение (12) в раскрытом виде можно записать так:

$$\alpha_{cm} F_{cm} \left( t_e(\tau) - t_{cm}(\tau) \Big|_{x=0} \right) = \lambda_{cm} \frac{\partial^2 t_{cm}(\tau)}{\partial x^2} \Big|_{x=0}, \quad (14)$$

где  $F_{cm}$  – площадь внутренней поверхности стены.

При этом начало координатной оси  $x$  расположено на внутренней поверхности ограждения. Таким образом, анализ влияния температуры воздуха в цехе на процесс сушки мы можем выполнить только после определения функциональных зависимостей  $t_e(\tau)$ ,  $t_o(\tau)$ ,  $t_{cm}(\tau)$ , т.е. после решения системы, которая состоит из уравнений (6), (10), (11). Решение уравнений теплопроводности необходимо выполнить при соответствующих граничных условиях. Это достаточно сложная задача. Сложность задачи еще более усугубляется, так как неизвестная функция  $Q_w(x, \tau)$ . Чтобы ее определить необходимо рассмотреть и описать с помощью уравнений влияние влажности воздуха в цехе на процесс переноса влаги с поверхности древесины и в массиве древесины. Решение этой задачи может существенно упроститься в том случае, если, к примеру, на основании эксперимента, при тех или иных температурных условиях будет известен тепловой поток, который необходимо подавать для испарения влаги. С другой стороны, в задачах, связанных с процессами сушки, как правило, необходимо найти этот тепловой поток. Как уже отмечалось, этот тепловой поток не является величиной постоянной и зависит от времени. В начальный момент времени, т.е. в начале процесса сушки, этот тепловой поток максимален, а по истечению бесконечного промежутка времени он равен нулю.

Таким образом, в статье достаточно подробно рассмотрен процесс изменения температуры воздуха в цехе при сушке древесины. Проанализирована физическая модель процессов, которые проходят во время

сушки. Сформулированы и записаны в математическом виде граничные условия для поверхности древесины в процессе сушки.

1. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 372 с.
2. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 336 с.
3. Сушка древесины. Справочник. Серия: «Деревообработка» / Составители Алюшин С., Березовский В., Билей П., Бурьшев С., Стрекалов С. – К.: ТМА «Тристан», 2004. – 448 с.
4. Селюгин Н.С. Сушка древесины. – Л.: Гослестехиздат, 1936. – 560 с.
5. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М. - Л.: Гослесбумиздат, 1949. – 527 с.
6. ГОСТ 19773-84. Пиломатериалы хвойных и лиственных пород. Режимы сушки в камерах периодического действия.
7. Руководящие материалы по камерной сушке пиломатериалов. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1977. – 153 с.
8. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. – Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. – 143 с.

*Получено 29.09.2011*

УДК 621.131

**М.В.ЧЕРНЯВСКАЯ, И.Т.КАРПАЛЮК, М.Л.ГЛЕБОВА**, кандидаты техн. наук  
*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЕНТИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Разработаны статистические модели для расчета формы кривой тока статора вентильных двигателей постоянного тока. Использована теория оптимального планирования эксперимента, что позволило значительно ускорить процесс исследования при одновременном повышении достоверности результатов. Полученные модели дают возможность анализа исследуемых функций, сочетающих простоту обработки и инженерную применимость.

Розроблено статистичні моделі для розрахунку форми кривої струму статора вентильних двигунів постійного струму. Використана теорія оптимального планування експерименту, що дозволило значно прискорити процес дослідження при одночасному підвищенні достовірності результатів. Отримані моделі дають можливість аналізу досліджуваних функцій, що поєднують простоту обробки і інженерну застосовність.

Statistical models are worked out for the calculation of form of curve of current of stator of valve engines of direct-current. The theory of the optimal planning of experiment is used, that allowed considerably to accelerate the process of research at the simultaneous increase of authenticity of results. The got models enable analysis of the investigated functions, combining simplicity of treatment and engineering applicability.

*Ключевые слова:* синхронная машина, вентильный двигатель, система дифференциальных уравнений.

Для систем электропривода с вентильными двигателями большой мощности конечное число фаз, а также неполная управляемость тири-